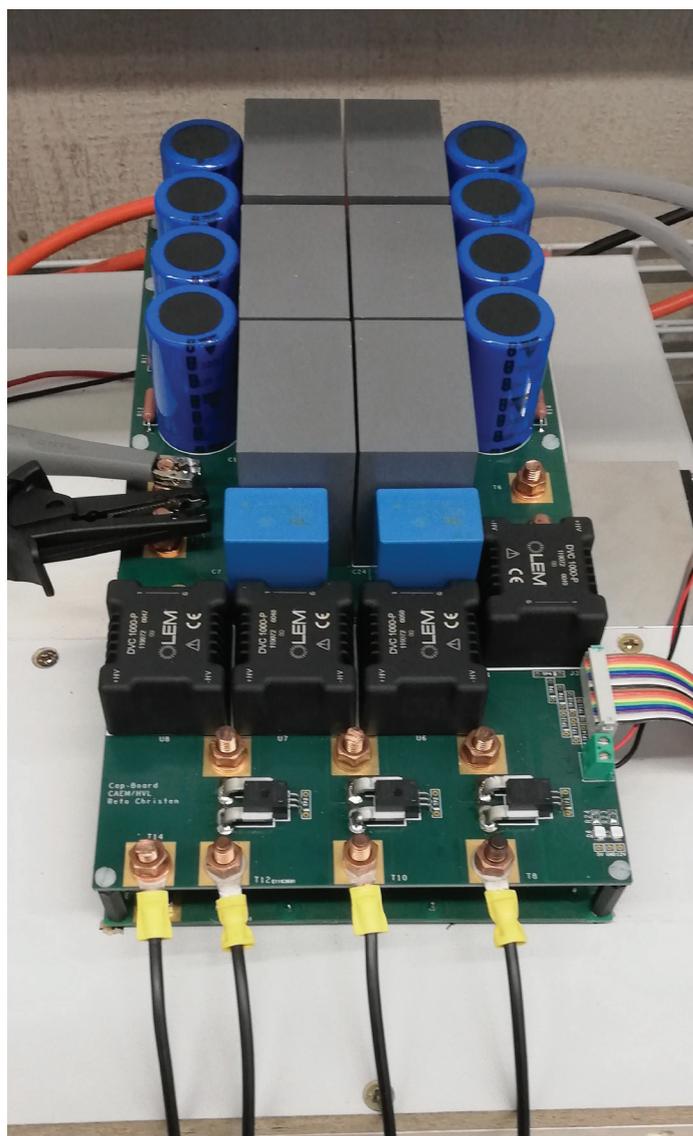


SCHALTELEMENTE DER SPARSAMEN ART

Vom Mobiltelefon über das Auto bis zum Rechenzentrum: Die vielfältigen elektrischen Anwendungen, die unseren Alltag sichtbar und unsichtbar prägen, enthalten alle Schaltelemente aus Halbleitermaterialien. In diesen leistungselektronischen Bauteilen schlummert ein riesiges Energiesparpotenzial, das sich durch Einsatz sogenannter Wide-Bandgap-Halbleiter freisetzen lässt. So lautet das Fazit eines Berichts von Expertinnen und Experten, die im Technologieprogramm 4E der Internationalen Energieagentur mit massgeblicher Beteiligung der Schweiz zusammenarbeiten.

Moderne, energieeffiziente Leistungselektronik ist eine Zukunftstechnologie – und einzelne Anwendungen sind bereits Gegenwart. Ein prominentes Beispiel liefert der US-amerikanische Elektroautohersteller Tesla. Er verwendet moderne MOSFET-Transistoren für das Antriebssystem des «Tesla Model 3». Die elektronischen Bauteile verhelfen dem Wechselrichter zu hoher Effizienz und steigern auf diesem Weg die Reichweite des weltweit meistverkauften Elektroautos. Auch die Eisenbahn-Nation Japan setzt auf moderne Elektronikkomponenten: Dort wird die jüngste Generation der Shinkansen-Hochgeschwindigkeitszüge mit neuartigen Transistoren



Forscher der Gruppe um Prof. Dr. Michael Schueller und Dr. Jasmin Smajic an der Ostschweizer Fachhochschule (früher: Hochschule für Technik Rapperswil/HSR) haben in einem Projekt SiC-MOSFETs für elektrische Antriebsstränge von Industriemotoren untersucht. MOSFET steht für Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor. Foto: Fachhochschule Ost

ausgerüstet. Diese sind nicht nur effizient, sondern auch kompakt. Neu kann das Antriebssystem im Boden der Personenwaggons statt in separaten Triebwagen untergebracht werden. Das erhöht die Kapazität der Züge.

Der Effizienzgewinn verdankt sich in beiden Fällen Transistoren der jüngsten Generation. Die elektronischen Schaltelemente sind nicht mehr – wie bisher üblich – aus dem Halbleitermaterial Silizium gefertigt, sondern aus Siliziumkarbid (SiC). Dieser Halbleiter gehört zusammen mit Galliumnitrid (GaN) zur Klasse der sogenannten Wide-Bandgap-Halbleiter (WBG-Halbleiter; siehe Textbox S. 4). Diese erlauben den Bau von Bauteilen, die in elektronischen Schalt- und Regelkreisen – so ein zentraler Vorteil – mit sehr geringen Verlusten arbeiten.

Intensive Forschung in der Schweiz

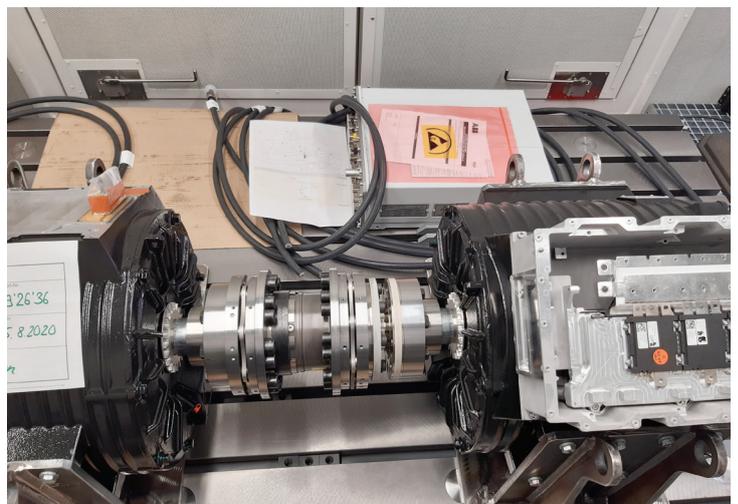
Auch die Schweizer Industrie exploriert bereits Anwendungen dieser Energieeffizienz-Technologie. Der Bushersteller Hess und das Industrieunternehmen ABB kooperieren dazu in einem vom BFE unterstützten Pilot- und Demonstrationsprojekt: In dem 2019 gestarteten Vorhaben entwickeln sie einen Umrichter auf SiC-Basis für elektrische Busse. Zwei weitere vom BFE unterstützte Forschungsprojekte befassen sich ebenfalls mit Wide-Bandgap-Technologien: Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der Fachhochschule Nordwestschweiz in Windisch untersuchen einen Wechselrichter auf einer hybriden Si/SiC-Basis für Anwendungen in Elektroautos. Derweil studieren Forscherinnen und Forscher der Ostschwei-

zer Fachhochschule am Standort Rapperswil den Einsatz von SiC-Transistoren in den elektrischen Antriebssträngen von Industriemotoren, unter anderem hinsichtlich Langlebigkeit.

Weitere Schweizer Projekte richten ihren Fokus auf SiC-Bauteile für AC/DC-Umrichter zur Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom, wie sie zum Beispiel in Ladestationen für Elektrofahrzeuge zum Einsatz kommen. Expertinnen und Experten der ETH Lausanne wiederum befassten sich in mehreren bereits abgeschlossenen Studien mit GaN-basierten Bauteilen für effiziente Hochspannungs-Gleichstromquellen (wie Batterieladegeräte) und Mikro-Konverter für Photovoltaikanlagen.

Weltweit mehr Strom sparen, als die Schweiz verbraucht

Transistoren aus SiC- und GaN-Halbleitern können zum Bau von verlustarmen Wechselrichtern zur Wandlung von Strom, Spannung und Frequenz genutzt werden. Das Sparpotenzial ist beträchtlich, wie die unter dem Dach der Internationalen Energieagentur (IEA) tätigen PECTA-Experten und -Expertinnen in einem im Frühjahr veröffentlichten Bericht zeigen. PECTA steht für «Power Electronic Conversion Technology Annex», auf Deutsch «Leistungselektronik zur Steuerung und Umwandlung elektrischer Energie». Der Annex wurde durch die Schweiz 2019 ins Leben gerufen und arbeitet seither unter der Federführung der Schweiz, Österreichs, Dänemarks und Schwedens. PECTA versammelt Fachleute aus der akademischen Forschung sowie Expertinnen und Experten aus der Industrie. Das Fachgremium ist Teil des IEA-Technologiepro-



Das Roadrunner-Projekt, in dem der Bushersteller Hess und der ABB-Konzern einen Umrichter auf der Grundlage von Siliziumkarbid entwickeln, wurde 2019 gestartet. Das Bild links zeigt einen Prototypen des Umrichters. Rechts der Prüfstand, auf dem unter anderem Fahrten simuliert werden können. Foto: ABB Schweiz AG

gramms 4E (für: Energie Efficient End-Use Equipment), das sich der Energieeffizienz von Endgeräten widmet.

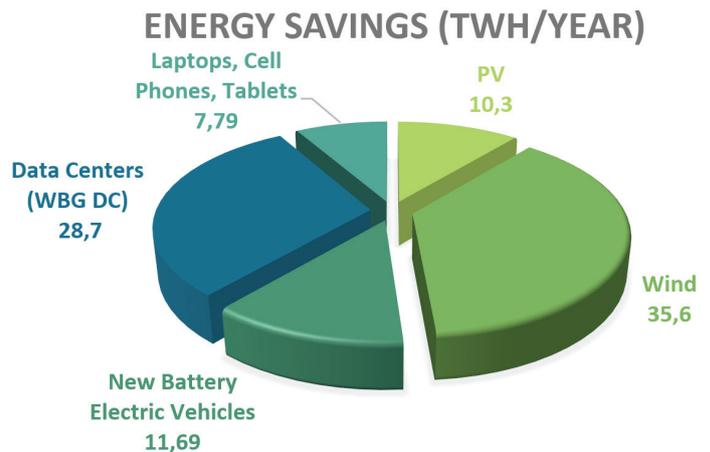
Die PECTA-Experten schätzen in ihrem Bericht für spezifische Anwendungen das Einsparpotenzial ab, welches sich durch Verwendung und Integration von WBG-Halbleitern in Leistungselektronik-Bauteilen erzielen liesse. Die Fachleute beziffern das weltweite jährliche Einsparpotenzial für fünf Anwendungsbereiche: Windkraftanlagen (36 TWh/Jahr), Rechenzentren (28 TWh/Jahr), Elektroautos (12 TWh/Jahr), Photovoltaik-Anlagen (10 TWh/Jahr) sowie Laptops, Tablets und Mobiltelefone (8 TWh/Jahr). Allein für diese fünf Bereiche beträgt das jährliche Einsparpotenzial in Summe 94 TWh, mehr als das Anderthalbfache des jährlichen Schweizer Stromverbrauchs. «Diese erste Überschlagsrechnung, die wichtige Bereiche wie beispielsweise Industriemotoren noch gar nicht einschliesst, zeigt das gewaltige Potenzial der WBG-Halbleiter. Wir sollten alles daran setzen, dieses Potenzial zu realisieren», sagt Roland Brüniger, Leiter des BFE-Forschungsprogramms Elektrizitätstechnologien und PECTA-Vorsitzender.

An der Schwelle zur Markteinführung

In gewissen Industriebranchen sind Bauteile mit WBG-Halbleitern heute schon in Anwendung, während die Entwicklung in anderen Wirtschaftszweigen noch weniger fortgeschritten ist. Die PECTA-Experten haben die verfügbaren Daten in einem Dokument zum Stand der Anwendungsreife (Application Readiness Map/ARM) zusammengefasst. Sie stützten sich



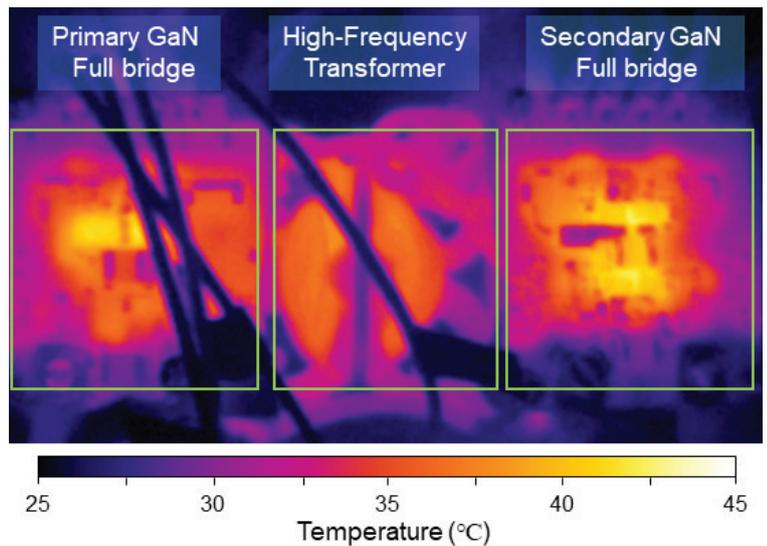
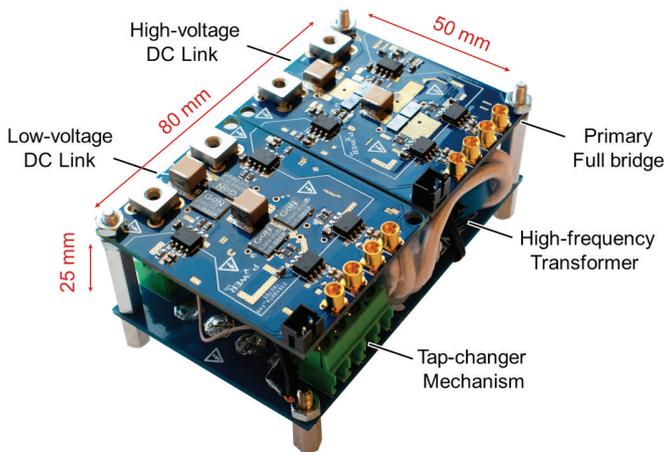
Das Team von Prof. Dr. Nicola Schulz hat an der Fachhochschule Nordwestschweiz (Standort Windisch) in einem vom BFE unterstützten Projekt einen DC-DC-Konverter (22 kW; Gleichspannung 700 V auf Gleichspannung 400 V) auf SiC-Basis aufgebaut und getestet. Foto: FHNW



Potenzielle weltweite Einsparungen in ausgewählten Anwendungsbereichen bei einem Umstieg auf WBG-Halbleiter. Grafik: PECTA-Bericht

hierbei auf Arbeiten des European Center for Power Electronics (ECPE), der Branchenorganisation der europäischen Leistungselektronik-Industrie. Gemäss ARM sind im Automobil- und Eisenbahnsektor, aber auch bei Rechenzentren, Stromnetz-Infrastruktur und Photovoltaik-Wechselrichtern erste Systeme mit WBG-Technologie auf dem Markt. Für den Zeitraum der nächsten zwei bis sechs Jahre werden weitere Produkte die Marktreife erreichen. Erwartet wird dieser Schritt unter anderem im Bereich der Industrie und der Industriautomation, bei grossen elektrischen Antrieben und bei Wechselrichtern von Windkraftwerken.

Der Markt der WBG-Halbleiter zeichnet sich durch hohe Dynamik aus. Der Blick auf die ARM mit der erwarteten Entwicklung macht aber auch deutlich, dass etliche WBG-Anwendungen nach heutiger Einschätzung frühestens 2030 auf den Markt kommen dürften bzw. erst ab dann einen signifikanten Marktanteil erreichen werden. Vor diesem Hintergrund könnten politische Massnahmen ratsam sein, die die Markteinführung der WBG-Technologie vorantreiben, wo sie technisch heute noch nicht ausgereift ist, noch nicht zuverlässig arbeitet oder ganz einfach noch zu teuer ausfällt. Als Entscheidungshilfe für die Politik listen die PECTA-Experten in ihrem Bericht eine Palette politischer Instrumente auf, die die Markteinführung beschleunigen könnten. In einem nächsten Schritt wollen sie die Massnahmen nun konkretisieren, um die Bereiche auszumachen, wo eine Förderung besonders wirkungsvoll wäre und grosse Einsparungen erzielt werden könnten. Ein solcher Bereich ist möglicherweise die Windenergie, die in den nächsten Jahren gemäss Prognosen weltweit noch kräftig zulegen soll.



Ein Forscherteam um Prof. Elison Matioli hat an der ETH Lausanne (EPFL) untersucht, wie sich die Effizienz von elektronischen Bauteilen mittels GaN-Halbleitern verbessern lässt. Links: Bild eines Gleichstrom-Gleichstrom-Konverters auf der Basis von GaN, der bei einer Frequenz von 300 kHz arbeitet. Rechts: Wärmebildkamera-Aufnahme von verschiedenen Stellen des Konverters belegen, dass die GaN-Bauteile relativ geringe Verluste in Form von Wärme aufweisen. Quelle: A. Jafari, M. Samizadeh Nikoo, F. Karakaya, and E. Matioli, "Enhanced DAB for Efficiency Preservation Using Adjustable-Tap High-Frequency Transformer," IEEE Trans. Power Electron., vol. 35, no. 7, pp. 6673–6677, Jul. 2020

Energieverbrauch über den ganzen Lebenszyklus hinweg

Die PECTA-Experten haben eine umfangreiche Dokumentation erarbeitet – und stehen doch erst am Anfang ihrer Arbeit. In ihrem Bericht skizzieren sie eine Palette von weiterführenden Forschungsansätzen, die zur Förderung der WBG-Technologie zielführend erscheinen. Dazu gehört das Thema Lebenszyklusanalysen, um den teilweise relativ hohen Energieverbrauch der Halbleiterproduktion im Gesamtzusammenhang einer technischen Lösung beurteilen zu können. Ein anderer wichtiger Punkt ist die Standardisierung, wie sie in Teilbereichen der Konverter für Motoren mit Normen der IEC (International Electrotechnical Commission) heute schon verfügbar ist. Standardisierungen, betonen die PECTA-Expertinnen und -Experten in ihrem Bericht, sollten in enger Kooperation mit der Industrie umgesetzt werden.

- **PECTA-Bericht** «Wide Band Gap Technology: Efficiency Potential and Application Readiness Map» unter: <https://www.iea-4e.org/news/pecta-first-report>
- Weitere Informationen zu **PECTA** unter <https://pecta.iea-4e.org/> oder <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/technologieprogramme/4e/iea-4e-tcp-pecta.php>
- Ein **Interview** mit Prof. Ulrike Grossner (ETH Zürich) zu den Perspektiven der WBG-Technologien finden Sie

unter: <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10023>

- **Auskünfte** zu dem Thema erteilt Roland Brüniger (roland.brueeniger[at]brueniger.swiss), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Elektrizitätstechnologien.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Elektrizitätstechnologien unter www.bfe.admin.ch/ec-strom.

SCHNELL, KLEIN, EFFIZIENT

Halbleiter mit einer grossen Bandlücke (engl. wide bandgap) erlauben den Bau von elektronischen Bauteilen, die verschiedene Vorteile aufweisen: Sie schalten schneller, verarbeiten höhere Spannungen und Frequenzen, können kleiner gebaut werden und arbeiten bei höheren Umgebungstemperaturen. Ein weiterer, entscheidender Vorteil: Bauelemente auf der Grundlage von WBG-Halbleitern weisen geringere Verluste auf, arbeiten also mit einer höheren Effizienz. Damit steht ein höherer Anteil der Energie für die jeweilige technische Anwendung zur Verfügung, statt in Form von Wärme verloren zu gehen. Geringere Wärmeverluste verringern den Energieaufwand zur Kühlung der elektronischen Schaltungen. BV